昆仑山北坡两种优势荒漠灌木的生物量预测模型

张元梅[1,2]， 孙桂丽[1,2]， 鲁 艳[3,4]， 李 利[3,4]， 张志浩[3,4]， 张栋栋[5]

（1. 新疆农业大学林学与风景园林学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 干旱区林业生态与产业技术重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆荒漠植物根系生态与植被修复重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；4. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 策勒 848300；5. 石河子大学生命科学学院，新疆 石河子 832003）

摘 要：构建数学模型是估算灌木生物量的重要方法之一。本研究以中昆仑山北坡山前荒漠带常见的两种荒漠灌木红砂(*Reaumuria soongarica*)和合头草(*Sympegma regelii*)为研究对象。采用全株收获法采集植株，分别以株高(*H*)、冠幅面积(*S*)、植株体积(*V*)为自变量，植株地上生物量(W_1)、地下生物量(W_2)、全株生物量(W_3)为因变量，建立函数模型，选取决定系数(R^2)、估计标准差(SEE)、回归检验显著水平(*P*值)为评价指标，以$P<0.001$为前提，选取R^2尽量大、SEE尽量小的模型为红砂和合头草生物量最优预测模型。结果显示：红砂和合头草的生物量最优预测模型均为二次函数模型，合头草全株最优预测模型为一次函数模型除外。红砂植株体积(*V*)与生物量的相关性最高，生物量最优预测模型R^2为0.820~0.920。合头草冠幅面积(*S*)与生物量相关性最高，生物量最优预测模型R^2为0.935~0.973。红砂和合头草生物量最优预测模型均通过($P<0.001$)显著性检验，拟合率在84.1%~95.6%之间，可用于生物量估算，本研究为预测荒漠生态系统碳储量和评价碳汇潜力提供科学依据。

关键词：荒漠灌木；生物量；预测模型；昆仑山

陆地生态系统生物量不仅是生态系统最为基本的数量特征参数[1-2]，也是研究生态系统物种与物种间、物种与环境间相互影响和适应的综合体现[3]，同时对生态系统碳循环具有重要的影响[4]。灌木分布面积仅次于草地，是森林面积的近2倍[5]，灌木在森林生态系统中占全部生物量的很少部分，但在荒漠、高原、干热河谷、荒山荒地和石漠化等生态脆弱地区，灌木仍然占有很大比重[6]，灌木作为荒漠生态系统中极为重要的植被类型，因其根系发达、抗逆性强的特点，在脆弱荒漠生态系统保护、修复和重建中发挥着重要作用[7-8]。荒漠灌木是植被碳库中重要的组成部分。目前，国内外有关陆地生态系统生物量的研究主要集中在森林植被和草地植被方面，针对典型荒漠灌木植被生物量的研究相对较少[9]。因此，精确估测灌木生物量，能够为保护和利用灌木资源提供有效的途径，同时，为准确估算陆地生态系统碳储量提供基础数据。

目前，有关灌木生物量的测定方法主要有直接收获法和间接估算法[10]，直接收获法不仅费时费力，刈割植被还会对原本脆弱的荒漠生态系统造成严重破坏，破坏后的植被难以恢复，因此，直接收获法不宜大面积在植被稀疏的荒漠区使用。间接估测法主要通过获取灌木易测因子构建模型，从而准确估测生物量，这种方法既有效减少了对植被的破坏，又能快速估算出灌木生物量[11]。建立灌木生物量模型，首先要根据植物形态选择易测因子作为参数，再通过多种评价指标对各类模型进行筛选，从而得到最优预测模型。灌木生物量模型的易测因子主要有株高（*H*）、冠幅直径（*C*）、基径（*D*）、分枝数（*N*）等单一变量及单一变量组成的复合变量，常见的复合变量有基径与株高组成的复合变量D^2H、冠幅面积（*S*）与株高组成的复合变量S^2H、H^2S、冠幅面积（*S*）、冠幅体积（*V*）等。常用的生物量模型形式主要有幂函数模型、一次函数模型、二次函数模型等[12-14]。

收稿日期：2023-06-11； **修订日期：**2023-09-08
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目子课题(2021xjkk0304010)；中国科学院"西部青年学者"项目(2021-XBQNXZ-018)
作者简介：张元梅（1998-），女，硕士研究生，主要从事荒漠化防治研究. E-mail: zhangyuanmeicj@163.com
通讯作者：鲁艳. E-mail: luyan@xjb.ac.cn

由于植物生长环境的多样复杂性，导致不同地区的同种植物，用以估算生物量的最佳变量和最优模型形式也不相同，但究竟使用哪种生物量预测模型效果更好，目前仍无统一的标准[11]。近年来，国内外学者对灌木生物量预测模型的相关研究逐渐增加，但是大多数报道集中在对荒漠灌木地上生物量的研究，对于地下生物量及全株生物量预测模型的研究报道仍较为缺乏，且现有的模型在精确度评估和验证方面的研究较少。

昆仑山中段北坡的前山地带，海拔高度2100~2400 m，主要以稀疏的荒漠灌木为优势种，其中，红砂（*Reaumuria soongarica*）和合头草（*Sympegma regelii*）为这一带广泛分布的优势种植物。目前，已有关于腾格里沙漠东南缘[15]、乌拉特荒漠[16]和西鄂尔多斯荒漠[17]等地的红砂生物量预测模型的研究报道，但缺乏有关昆仑山北坡山前荒漠灌木带红砂生物量预测的研究，而关于合头草生物量预测模型的研究鲜见报道。本研究以昆仑山中段北坡分布的优势植物红砂和合头草为研究对象，以株高(H)、冠幅面积(S)和植株体积（V）为易测因子，构建地上、地下以及全株生物量预测模型，并对预测模型进行综合评价，筛选出最优模型，实现通过植株易测因子来估算生物量，以期为研究荒漠生态系统碳储量和评价碳汇潜力提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠南缘，昆仑山中段北坡的前山带地区，海拔高度为2100~2400 m，地理坐标为36°23′46″~36°27′57″N，80°42′59″~80°43′25″E。该区域全年平均气温为4.7 ℃，极端最高温度为30.4~34.0 ℃，极端最低温度为−25 ℃，年降水量127.5~201.2 mm。前山带在塔南地貌单元中属于低山带，海拔为2200~3000 m，山势平缓，大量堆积着昆仑黄土，土壤类型为砾质荒漠土和棕漠土[18]。

1.2 样品采集

2022年7月，在研究区选取红砂40株，其中，25株用于模型建立，15株用于模型验证；选取合头草45株，其中，30株用于模型建立，15株用于模型验证。在选取样本株时，按照大、中、小冠幅均匀选取，对选定植株作为样本分别进行标记，并在野外测量各标准株的株高（H）、冠幅长轴(D_1)、冠幅短轴(D_2)，测量完毕后采取全挖法将标准株整株挖出，为保证地下生物量的精确，挖掘深度与水平范围为根系分布所达范围，将植株地下根系全部挖出，去除根系上附着的土壤后，将植株分开装入袋中，带回实验室处理。用修枝剪从植株基部分离地上部分和地下部分，在80 ℃恒温烘箱中烘48 h至恒重，称量各植株地上和地下部分干重。

1.3 生物量模型构建

选取株高(H)、冠幅面积S($S=\frac{D_1}{2}\times\frac{D_2}{2}\times\pi$)与植株体积V($V=\frac{1}{3}\times H\times S$)为自变量，以地上生物量（W_1）、地下生物量(W_2)及全株生物量(W_3)为因变量。采集标准株的参数如表1所示，由于在采集样品过程中，选取的植株按大、中、小3个层次均匀选取，因此各变量的标准差较大。

选取一次函数、对数函数、幂函数、指数函数和二次函数模型进行拟合分析，公式如下：

$$\text{一次函数：} W=aX+b \quad (1)$$

$$\text{对数函数：} W=a+b\ln X \quad (2)$$

$$\text{幂函数：} W=aX^b \quad (3)$$

$$\text{指数函数：} W=ae^{bX} \quad (4)$$

$$\text{二次函数：} W=a+bX+cX^2 \quad (5)$$

式中：W为生物量；a、b、c为常数；e为自然对数的底；X为自变量（H、S、V）。

1.4 数据分析

本研究以决定系数(R^2)、估计标准差(SEE)的大小以及回归检验显著水平(P值)作为评价指标，以回归检验显著水平(P<0.001)为前提，从中筛选出R^2尽

表1 2种灌木的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the two shrubs

名称	H/cm	S/cm^2	V/cm^3	W_1/g	W_2/g	W_3/g
红砂	21.92±7.37	2264.42±1535.76	18327.49±17394.53	109.97±74.99	59.44±51.13	169.41±122.67
合头草	24.80±7.32	1279.61±1014.76	12571.02±13741.84	29.89±32.44	107.07±100.83	136.72±132.00

注：数据为平均值±标准差。

量大、SEE尽量小的模型作为该物种的最优生物量预测模型。模型的精度是模型应用的重要保证，为保证筛选的生物量最优模型精度，将未参与建模的红砂和合头草用于实测生物量值与模型预测值进行回归分析，验证模型的准确度。数据统计和模型分析分别在Excel和SPSS中完成，制图在Origin中完成。

2 结果与分析

2.1 地上生物量模型分析

由表2可知，红砂地上生物量与易测因子存在密切的相关性，均通过$P<0.001$的显著性检验。其中体积(V)与地上生物量的相关性最好且SEE最小，因此，以体积(V)建立的模型为红砂地上生物量最优预测模型。合头草地上生物量与易测因子的相关性较好，其回归检验均在$P<0.001$水平上达到极显著(表2)，冠幅面积(S)和体积(V)建立的预测模型$R^2>0.9$，有较好的地上生物量预测效果。综合模型的拟合效果和精度水平，确定冠幅面积(S)建立的模型为合头草地上生物量最优预测模型。

2.2 地下生物量模型分析

如表3所示，通过对各易测因子进行回归分析，红砂3种模型均通过$P<0.001$的显著性检验，株高(H)与红砂地下生物量的相关性较差，其中以体积(V)建立的模型R^2最大，且SEE最小，因此，确定以体积(V)建立的模型为红砂地下生物量最优模型。合头草的地下生物量模型总体优于地上生物量模型，均通过$P<0.001$的显著性检验(表3)，合头草地下生物量与冠幅面积(S)的相关性最好，其地下生物量最优预测模型为以冠幅面积(S)建立的二次函数模型。

2.3 全株生物量模型分析

如表4所示，红砂3种全株生物量模型回归检验均在$P<0.001$水平上达到极显著，相较于体积(V)，株高(H)和冠幅面积(S)与红砂地上生物量的相关性较差。因此，选择以体积(V)建立的模型为红砂的全株生物量最优预测模型。合头草的3种全株生物量均通过$P<0.001$的显著性检验(表4)，且冠幅面积(S)和植株体积(V)的$R^2>0.95$，说明冠幅面积(S)和体积(V)与合头草全株生物量存在密切相关性。综合模型的拟合效果和精度水平，合头草全株生物量最优预测模型为以冠幅面积(S)建立的一次函数模型。

在红砂和合头草的所有预测模型中，相比与冠幅面积(S)和体积(V)，以株高(H)建立的预测模型拟合度较差，说明株高与生物量的相关性较差，不能很好的反映红砂和合头草的生物量特征。

2.4 最优预测模型验证

如图1所示，将未参与建模的红砂和合头草通

表2 基于不同参数的地上生物量最优预测模型

Tab. 2 Optimal prediction model for above-ground biomass based on different parameters

名称	因变量	变量	模型	R^2	SEE	P
红砂	W_1	H	$W_1 = 0.0486H^2+5.0658H-26.934$	0.548	52.653	0.000
		S	$W_1 = -3E-06S^2+0.0597S-5.9616$	0.831	32.242	0.000
		V	$W_1 = -4E-08V^2+0.0062V+17.884$	0.909	23.591	0.000
合头草	W_1	H	$W_1 = 0.1307H^2-3.6823H+34.018$	0.684	18.906	0.000
		S	$W_1 = 4E-06S^2+0.0166S-0.849$	0.935	8.55	0.000
		V	$W_1 = 5E-09V^2+0.002V+2.7985$	0.922	9.387	0.000

表3 基于不同参数的地下生物量最优预测模型

Tab. 3 Optimal prediction model for belowground biomass based on different parameters

名称	因变量	变量	模型	R^2	SEE	P
红砂	W_2	H	$W_2 = 0.0914H^2 + 0.017H+10.41$	0.468	38.918	0.000
		S	$W_2 = 3E-06S^2 + 0.0116S+13.487$	0.694	29.523	0.000
		V	$W_2 = 2E-08V^2 + 0.0012V+23.284$	0.820	22.676	0.000
合头草	W_2	H	$W_2 = 0.302H^2-5.0247H+30.243$	0.741	53.216	0.000
		S	$W_2 = -2E-06S^2+0.1056S-22.589$	0.964	19.739	0.000
		V	$W_2 = -6E-08V^2+0.0103V+0.015$	0.955	22.143	0.000

表4 基于不同参数的全株生物量预测模型

Tab. 4 Optimal prediction model of whole plant biomass based on different parameters

名称	因变量	变量	模型	R^2	SEE	P
红砂	W_3	H	$W_3=0.1399H^2+5.0827H-16.524$	0.541	86.784	0.000
		S	$W_3=0.1088S^{0.94}$	0.693	0.505	0.000
		V	$W_3=-1E-08V^2+0.0074V+41.168$	0.902	40.211	0.000
合头草	W_3	H	$W_3=0.4358H^2-8.8662H+65.938$	0.741	69.607	0.000
		S	$W_3=0.1283S-27.455$	0.973	22.134	0.000
		V	$W_3=-6E-08V^2+0.0123V+2.454$	0.962	26.479	0.000

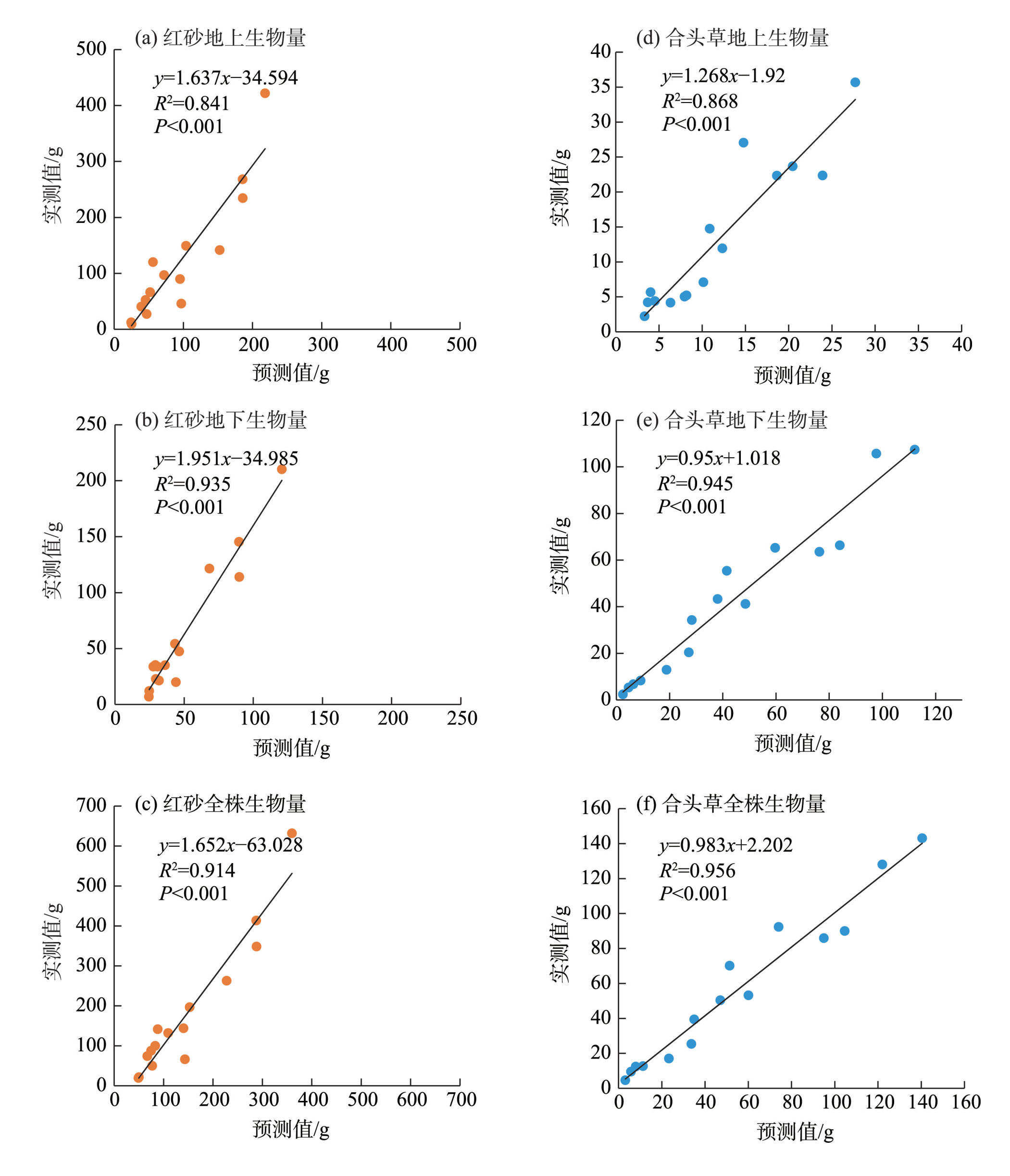


图1 生物量最优预测模型验证

Fig. 1 Biomass optimal prediction model validation

过各自最优生物量预测模型计算出对应的生物量预测值,对实测值与预测值进行回归分析,研究表明,红砂模型拟合率为84.1%~93.5%,合头草模型拟合率为86.8%~95.6%,验证结果表明:模型精度较高,可应用于红砂和合头草生物量估算。

2.5 地上生物量与地下生物量关系

如图2a所示,红砂和合头草的地上生物量与地下生物量相关性较高,因此,在已知红砂和合头草

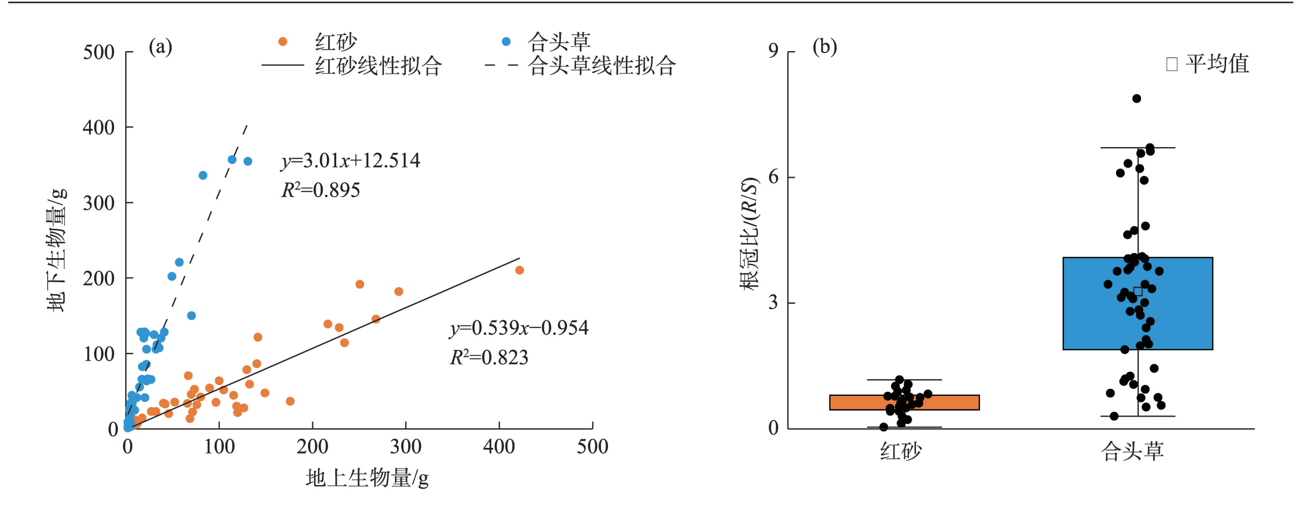


图2 地上生物量与地下生物量关系

Fig. 2 Above-ground biomass versus below-ground biomass

地上生物量条件下,可用地上生物量来估测地下生物量。如图2b所示,相同生长环境下,红砂根冠比平均值为0.58,合头草根冠比平均值为3.61,说明红砂为充分利用环境资源将更多生物量分配于地上部分,合头草将更多生物量分配于地下部分。

3 讨 论

3.1 自变量的选取

通过构建数学模型来预测植被生物量是一种常见的方法,既减少对植被的破坏,又通过易测因子可以快速得出生物量,提高了野外工作的效率,同时也具有较高的拟合度,生物量模型误差主要由因子选择和模型形式两个方面决定[19]。有学者在选取易测因子时,除株高(H)、冠幅面积(S)、体积(V),还选取了地径(D)与株高(H)的复合变量DH、D^2H、DH^2等,其中以D^2H应用较多,D^2H代表了植物的横纵面积,在各种生态环境下可作为建立植被生物量预测模型的良好变量[20-22],但在荒漠区灌木根部很容易被沙埋,形成灌丛沙堆,故地径无法准确测量,不易实现,且多地面分枝的丛生灌木,对根系生物量进行分解,要逐一测量基径,增大了误差,从而影响模型精度[15],同时增加了实际调查难度,降低模型的实用性[22]。本研究中测得的冠幅和株高及其复合变量也可以反映植株形态特征,且容易获得,建立的模型精度较高,这与前人的研究结论相一致[23-25]。

不同因子反映植株不同的生物学意义,株高、基径反映个体纵向或横向生长的变化,而生物量积累是生物个体各种变化的综合,选用复合变量会更好地反映出个体生物量的特征[22,26-27]。相关研究表明,复合变量与生物量的相关性比单一变量更强[13,28]。本研究红砂和合头草以单一变量株高(H)为变量建立的模型,拟合度均低于以冠幅面积(S)和体积(V)为变量建立的模型,复合变量冠幅面积(S)和体积(V)更适合作为建立生物量预测模型的变量。因此,在建立灌木生物量预测模型时,从多维度角度出发,选取合适的复合变量可以进一步提高模型拟合度。

3.2 模型的形式

高精度模型的选择是预测生物量关键[29-30]。其中,幂函数(相对生长模型、异速生长方程)是估算大多灌木生物量最常用的模型,在众多相关研究中取得了较好的生物量估测效果[31-33]。由于不同灌木之间形态特征各异,因此,幂函数模型的生物量预测效果在不同灌木中也各有差异,有学者提出采用二次函数模型或者三次及更高阶的多项式模型预测生物量可以得到更好的效果,随着回归模型的复杂程度可以使R^2趋于1[32,34],已有研究表明,暖温带森林生态系统林下灌木生物量回归模型以二项式函数模型为主[27]。二次函数模型是部分荒漠灌木地上生物量预测较理想的模型,且具有较高的R^2[12,14,35]。本研究表明,除合头草全株生物量最优预测模型是一次函数外,其余生物量最优预测模型均为二次函数模型,这与前人得出的红砂最优生物量预测模型形式不同[17]。因此,对于不同生境,幂函数模型不一定是灌木生物量最优预测模型形式,需要根据灌木的生存环境和生长形态,以不同的自变量建立不同

的函数模型来筛选生物量最优预测模型。

3.3 根冠比

荒漠灌木分配特征是研究荒漠生态系统结构、功能、物质和能量流动的重要指标[11],而根冠比(*R*/*S*)作为反映植物地上生物量与地下生物量关系的重要参数,在生态系统功能评价中具有重要的意义。植物地上生物量和地下生物量的分配受植物的物种特征、个体发育和生存环境的直接影响,植物通过生物量分配调节来响应外界环境条件,从而维持其最优的生长模式[29,36],以提高植物环境变化或胁迫的生存能力[37-38],是对环境长期适应的结果。在本研究中,相同生长环境下的红砂和合头草根冠比差异较大,红砂主要将生物量分配给茎、叶,而合头草将生物量主要分配给根,这由两种荒漠植物生物学特性决定,说明在进行灌丛生物量分配格局研究过程中,不能简单地由物种水平的地上和地下生物量分配特征直接外推到群落水平[39]。西鄂尔多斯地区和腾格里沙漠红砂根冠比均值接近于1[15,17],而本研究中红砂根冠比均值为0.58,导致这种差异的原因可能是不同生境导致植物的生物量分配策略发生变化。研究发现,重度干旱胁迫使得红砂幼苗总根长、根表面积、比根长和根系直径均增大[40],除干旱对红砂的单因素影响外,水分、CO_2浓度、氮素等多因素交互作用对红砂的生长也有不同的影响,从而导致不同环境下的根冠比差异[41]。

4 结 论

本研究以昆仑山中段北坡前山带优势植物红砂和合头草为研究对象,通过选取不同自变量,建立不同形式生物量预测模型,并对最优生物量预测模型进行验证。结果表明,红砂和合头草的生物量与自变量有极显著的相关关系($P<0.001$),模型拟合度和精度较高,最优模型以二次函数模型为主。说明红砂和合头草的6种生物量最优模型均具有一定的参考价值,可作为红砂和合头草的生物量估算,可应用于荒漠灌丛生态系统碳储量和碳循环等方面的研究。本研究所调查的两种荒漠灌木红砂和合头草为昆仑山中段北坡前山带分布优势植物,由于植株生长状况受众多因素影响,在空间生长上具有差异性,因此,若在研究区外使用该模型,需对模型加以验证和校正。

参考文献(References):

[1] Tilman D, Reich P B, Knops J M H, et al. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment[J]. Nature, 2006, 441: 629-632.

[2] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems[J]. Science, 2007, 317: 58-62.

[3] 郭洁芸, 王雅歆, 李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4823-4833. [Guo Jieyun, Wang Yaxin, Li Jianlong. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4823-4833.]

[4] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S, et al. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes[J]. Global Change Biology, 2010, 12(1): 84-96.

[5] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544. [Hu Huifeng, Wang Zhiheng, Liu Guohua, et al. Vegetation carbon storage of major shrub lands in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 539-544.]

[6] Zandler H, Brenning A, Samimi C, et al. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: Comparing empirical methods in a high dimensionalsetting[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 158: 140-155.

[7] 沈芳宇, 王永东, 李生宇, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤团聚体特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(5): 910-917. [Shen Fangyu, Wang Yongdong, Li Shengyu, et al. Study on soil aggregates of the desert high way shelterbelt in Tarim[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(5): 910-917.]

[8] 王永东, 李生宇, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林咸水灌溉土壤盐渍化状况研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 886-891. [Wang Yongdong, Li Shengyu, Xu Xinwen, et al. Soil salinization of the windbreak forest belts irrigated with saline water alongside the Tarim Desert Highway[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 886-891.]

[9] 杨弦, 郭焱培, 安尼瓦尔·买买提, 等. 中国北方温带灌丛生物量的分布及其与环境的关系[J]. 植物生态学报, 2017, 41 (1): 22-30. [Yang Xian, Guo Yanpei, Mohhamot Anwar, et al. Distribution of biomass in relation to environments in shrublands of temperate China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 22-30.]

[10] 马普, 陶梦, 吕世海, 等. 库布齐沙地柠条叶生物量及营养估测模型[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 33-41. [Ma Pu, Tao Meng, Lv Shihai, et al. Estimation models of leaf biomass and nutrient content for *Caraganakorshinskii* in Kubuqi Sandy Land of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40 (8): 33-41.]

[11] 陶冶, 张元明. 荒漠灌木生物量多尺度估测——以梭梭为例[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 1-10. [Tao Ye, Zhang Yuanming. Multi-scale biomass estimation of desert shrubs: A case study of *Haloxy-*

lon ammodendron in the Gurbantunggut Desert, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(6): 1-10.]

[12] 赵梦颖, 孙威, 罗永开, 等. 内蒙古26种常见温带灌木的生物量模型[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1219-1228. [Zhao Mengying, Sun Wei, Luo Yongkai, et al. Models for estimating the biomass of 26 temperate shrub species in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1219-1228.]

[13] 张殿岱, 王雪梅. 塔里木盆地北缘绿洲-荒漠过渡带典型植物地上生物量估测[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3211-3220. [Zhang Diandai, Wang Xuemei. Estimating aboveground biomass of typical plant species in the oasis-desert transition zone of northern Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(10): 3211-3220.]

[14] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851. [Qiu Yao, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Biomass estimation modeling and adaptability analysis of organ allocation in sixcommon shrub species in Tianshan Mountains forests, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7842-7851.]

[15] 杨昊天, 李新荣, 王增如, 等. 腾格里沙漠东南缘4种灌木的生物量预测模型[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1699-1704. [Yang Haotian, Li Xinrong, Wang Zengru, et al. Biomass estimation models of four shrub species at southeastern edge of the Tengger Desert [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1699-1704.]

[16] 李香云, 岳平, 程欢, 等. 乌拉特荒漠草原红砂生物量预测模型[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 462-469. [Li Xiangyun, Yue Ping, Cheng Huan, et al. Biomass prediction model for *Reaumuria soongorica* in the Urat desert steppe in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 37(2): 462-469.]

[17] 党晓宏, 高永, 蒙仲举, 等. 西鄂尔多斯地区5种荒漠优势灌丛生物量分配格局及预测模型[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 100-108. [Dang Xiaohong, Gao Yong, Meng Zhongju, et al. Biomass allocation patterns and estimation model of five desert shrub species in West Ordos region[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 100-108.]

[18] 朱军涛, 李向义, 张希明, 等. 昆仑山北坡4种优势灌木的气体交换特征[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3522-3530. [Zhu Juntao, Li Xiangyi, Zhang Ximing, et al. The gas exchange characteristics of four shrubs on the northern slope of Kunlun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3522-3530.]

[19] 姚正阳, 刘建军. 西安市4种城市绿化灌木单株生物量估算模型[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 111-116. [Yao Zhengyang, Liu Jianjun. Models for biomass estimation of four shrub species planted in urban area of Xi'an City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 111-116.]

[20] 赵成义, 宋郁东, 王玉潮, 等. 几种荒漠植物地上生物量估算的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 49-52. [Zhao Chengyi, Song Yudong, Wang Yuchao, et al. Estimation of aboveground biomass of desert plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 49-52.]

[21] 马媛, 李钢铁, 潘羿壅, 等. 浑善达克沙地3种灌木生物量的预测模型[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 198-201. [Ma Yuan, Li Gangtie, Pan Yiyong, et al. Prediction model for biomass of 3 shrubs in Hunshandake sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 198-201.]

[22] 陈国鹏, 杨克彤, 张金武, 等. 甘肃南部7种高寒杜鹃生物量模拟[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5377-5384. [Chen Guoping, Yang Ketong, Zhang Jinwu, et al. Biomass simulation of seven alpine *Rhododendrons* species in the south of Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5377-5384.]

[23] 王建成, 施翔, 张道远, 等. 克隆植物准噶尔无叶豆的种群生物量结构及回归模型[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 73-76. [Wang Jiancheng, Shi Xiang, Zhang Daoyuan, et al. Biomass allocation and biomass estimation models of the clonal plant population of *Eremosparton songoricum*[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 73-76.]

[24] 戎荣, 孙斌, 武志涛, 等. 灌丛化草原小叶锦鸡儿灌丛地上生物量测量方法研究[J]. 草业学报, 2023, 32(1): 36-47. [Rong Rong, Sun Bin, Wu Zhitao, et al. Study on above-ground biomass measurement of *Caragana microphylla* in shrub-encroached grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1): 36-47.]

[25] 崔光帅, 张林, 沈维, 等. 西藏雅鲁藏布江流域中段砂生槐灌丛生物量分配及碳密度[J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 53-61. [Cui Guangshuai, Zhang Lin, Shen Wei, et al. Biomass allocation and carbon density of *Sophora moorcroftiana* shrublands in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Xizang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 53-61.]

[26] 汪珍川, 杜虎, 宋同清, 等. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4462-4472. [Wang Zhenchuan, Du Hu, Song Tongqing, et al. Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4462-4472.]

[27] 万五星, 王效科, 李东义, 等. 暖温带森林生态系统林下灌木生物量相对生长模型[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6985-6992. [Wan Wuxing, Wang Xiaoke, Li Dongyi, et al. Biomass allometric models for understory shrubs of warm temperate forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6985-6992.]

[28] 姚雪玲, 姜丽娜, 李龙, 等. 浑善达克沙地6种灌木生物量模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 905-912. [Yao Xueling, Jiang Lina, Li Long, et al. Biomass simulation of six shrub species in Otindag Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 905-912.]

[29] 秦立厚, 张茂震, 钟世红, 等. 森林生物量估算中模型不确定性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7912-7919. [Qin Lihou, Zhang Maozhen, Zhong Shihong, et al. Model uncertainty in forest biomass estimation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7912-7919.]

[30] Huff S, Poudel K P, Ritchie M, et al. Quantifying aboveground biomass for common shrubs in northeastern California using nonlin-

ear mixedeffect models[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 424: 154−163.

[31] 叶静芸, 吴波, 刘明虎, 等. 乌兰布和沙漠东北缘荒漠−绿洲过渡带植被地上生物量估算[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1216−1225. [Ye Jingyun, Wu Bo, Liu Minghu, et al. Estimation of aboveground biomass of vegetation in the desert-oasis ecotone on the northeastern edge of the Ulan Buh Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1216−1225.]

[32] 童新风, 杨红玲, 宁志英, 等. 科尔沁沙地优势固沙灌木的生物量预测模型[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 553−559. [Tong Xinfeng, Yang Hongling, Ning Zhiying, et al. Biomass estimation models for dominant sand-fixing shrubs in Horqin sand land[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 553−559.]

[33] 李宗英, 罗庆辉, 许仲林. 西天山雪岭云杉林分密度对森林生物量分配格局和异速生长的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 545−552. [Li Zongying, Luo Qinghui, Xu Zhonglin. Effects of stand density on the biomass allocation and tree height-diameter allometric growth of *Picea schrenkiana* forest on the northern slope of the western Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 545−552.]

[34] 王蕾, 张宏, 哈斯, 等. 基于冠幅直径和植株高度的灌木地上生物量估测方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(5): 700−704. [Wang Lei, Zhang Hong, Ha Si, et al. A study on the estimating method of shrub upper biomass based on the crown diameter and plant height[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2004, 40(5): 700−704.]

[35] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 库布其沙漠北缘8种荒漠灌丛生物量预测模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 168−174. [Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. The biomass estimation models for eight desert shrub species in northern edge of the Hobq Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 168−174.]

[36] 种培芳, 刘晟彤, 姬江丽, 等. 模拟CO_2浓度升高和降雨量变化对红砂生物量分配及碳氮特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2065−2073. [Chong Peifang, Liu Shengtong, Ji Jiangli, et al. Influence of elevated CO_2 and precipitation regimes on biomass allocation and carbon and nitrogen content characteristics of *Reaumuria soongorica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2065−2073.]

[37] 张宗芳, 徐将, 师小军. 新疆野苹果幼苗生长及生物量分配对降水量和降水间隔时间的响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 102−110. [Zhang Zongfang, Xu Jiang, Shi Xiaojun. Responses of seedling growth and biomass allocation of *Malus sieversii* to precipitation amount and precipitation interval[J]. Arid Zone Research. 2023, 40(1): 102−110.]

[38] 徐梦琦, 高艳菊, 张志浩, 等. 干旱胁迫对疏叶骆驼刺幼苗生长和生理的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 257−267. [Xu Mengqi, Gao Yanju, Zhang Zhihao, et al. Effects of drought stress on growth and physiology of *Alhagi sparsifolia* seedlings[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 257−267.]

[39] 聂秀青, 杨路存, 李长斌, 等. 三江源地区高寒灌丛生物量空间分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 538−545. [Nie Xiuqing, Yang Lucun, Li Changbin, et al. Patterns of biomass partitioning across alpine shrubs in the Three-River Source Region Source Region[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(4): 538−545.]

[40] 杨彪生, 单立山, 马静, 等. 红砂幼苗生长及根系形态特征对干旱−复水的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 469−478. [Yang Biaosheng, Shan Lishan, Ma Jing. et al. Response of growth and root morphological characteristics of *Reaumuria soongorica* seedlings to drought-rehydration[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 469−478.]

[41] 杨洁, 单立山, 白亚梅, 等. 氮添加和降水变化对红砂生理指标的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 460−468. [Yang Jie, Shan Lishan, Bai Yamei, et al. Effects of nitrogen addition and precipitation on *Reaumuria soongorica* physiological indices[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 460−468.]

Biomass estimation models for two dominant desert shrubs on the northern slopes of Kunlun Mountain

ZHANG Yuanmei[1,2], SUN Guili[1,2], LU Yan[3,4], LI Li[3,4],
ZHANG Zhihao[3,4], ZHANG Dongdong[5]

(1. College of Forestry and Langscape Architeture, Xinjiang Agricultural University,Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Forestry Ecology and Industrial Technology in Arid Areas, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
3. Xinjiang Desert Plant Roots Ecology and Vegetation Restoration Laboratory, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystem, Cele 848300, Xinjiang, China; 5. College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: Mathematical modeling is an important method for estimating shrub biomass. In this study, two desert shrubs, *Reaumuria soongarica* and *Sympegma regelii*, commonly found in the Piedmont belt of the northern slopes of the mid-Kunlun Mountains, were observed. The whole-plant harvesting method was employed, and plant height (H), canopy area (S), and plant volume (V) were used as independent variables. Plant above-ground biomass (W_1), below-ground biomass (W_2), and whole-plant biomass (W_3) were used as dependent variables to establish the function model. The selection of optimal biomass estimation models for these two desert shrubs was based on the largest determination coefficient (R^2), smallest estimated standard deviation (SEE), and significance level ($P < 0.001$). The results indicated that quadratic function models were optimal for estimating biomass in both *R. soongarica* and *S. regelii*, except for the whole-plant optimal prediction model of *S. regelii*, which followed a linear function. For *R. soongarica*, the highest correlation was observed between plant volume (V) and biomass, with R^2 ranging from 0.820 to 0.920. For *S. regelii*, the highest correlation was between canopy area (S) and biomass, with R^2 ranging from 0.935 to 0.973. All optimal models for biomass estimation in *R. soongarica* and *S. regelii* passed the significance test ($P<0.001$), with fit rates ranging from 84.1% to 95.6%. These models were deemed reliable for biomass estimation. The outcomes of this study can offer valuable insights for studying carbon stocks and evaluating carbon sink potential in desert ecosystems.

Keywords: desert shrub; biomass; estimation model; Kunlun Mountain